大跨度开合屋盖的风致干扰效应研究

孙芳锦[1,2],尚俊晨[3,4],白松豪[3],张大明[5],徐中豪[3]

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院,541004 桂林;2. 广西岩土力学与工程重点实验室,541004 桂林;
3. 辽宁工程技术大学土木工程学院,123000 阜新;4. 中建三局集团(深圳)有限公司,518000 深圳;
5. 桂林理工大学信息科学与工程学院,541006 桂林)

摘　要:采用计算流体力学(CFD)方法,研究了在不同开合情况下,受单体干扰建筑影响时大跨度开合屋盖结构的风压分布规律及风致干扰效应。首先采用 TTU 试验数据和风洞试验数据验证了 CFD 方法的准确性;然后研究了施扰建筑在不同条件下,目标大跨度开合屋盖表面的风压分布规律。研究结果表明:随着干扰建筑物与大跨度开合屋盖间距增大,结构表面的风压系数逐渐增大,遮挡效应减小;大跨度开合结构屋盖的开合情况对屋盖表面的风压系数的分布起着较为明显的影响作用;当周围存在干扰建筑时,大跨度开合屋盖的表面风压分布发生明显变化,风致干扰效应不容忽略。

关键词:大跨度开合结构;风致干扰效应;CFD;干扰因子

中图分类号:TU33　　　　**文献标志码:**A

Wind-induced interference effect of large-span retractable structure

SUN Fangjin[1,2],SHANG Junchen[3,4],BAI Songhao[3],ZHANG Daming[5],XU Zhonghao[3]

(1. College of Civil Engineering and Architecture,Guilin University of Technology,541004 Guilin,China;
2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,541004 Guilin,China;
3. College of Civil Engineering,Liaoning Technical University,123000 Fuxin,China;
4. China Construction Third Engineerning Bureau Co. Ltd. ,518000 Shenzhen,China;
5. College of Information Science and Engineering,Guilin University of Technology,541006 Guilin,China)

Abstract: When there are other disturbing buildings around the retractable roof,the surrounding wind field changes,resulting in more complicated wind pressure distribution on the retractable roof,but the current research on the wind-induced disturbance effect of the long-span retractable roof structure is relatively limited. In the work here,computational fluid dynamics (CFD) method is used to study the wind pressure distribution and wind-induced disturbance of long-span retractable roof structures under the influence of individual buildings under different retractable conditions. First,TTU experimental data and wind tunnel test data are used to verify the accuracy of CFD method in this paper. Then the wind pressure distribution

收稿日期:2020-10-15　　**修回日期:**2021-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52178468);广西自然科学基金(No. 2019GXNSFAA245037);广西青年创新人才科研专项(No. 桂科AD19245012);广西建筑新能源与节能重点实验室自主课题(No. 桂科能 19-J-21-14);广西岩土力学与工程重点实验室课题(No. 桂科能 19-Y-21-2);桂林理工大学科研启动基金(No. GUTQGJJ2019042;No. GUTQDJJ2019041)

通信作者:张大明,副教授,研究方向为智能算法、数值计算、结构优化。E-mail:e_horse@163. com

引用格式:孙芳锦,尚俊晨,白松豪,等. 大跨度开合屋盖的风致干扰效应研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):195-200.
SUN Fangjin,SHANG Junchen,BAI Songhao,et al. Wind-induced interference effect of large-span retractable structure[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):195-200.

on the surface of the long-span retractable roof is studied under different conditions. The results show that with the increase of the space between the disturbed building and the long-span retractable roof, the wind pressure coefficient on the structure surface increases gradually, and the shielding effect decreases. The retractable conditions of long-span retractable roof have a significant influence on the distribution of wind pressure coefficient on the roof surface. Studies have shown that when there are disturbing buildings around, the distribution of wind pressure on the surface of large-span roofs has changed significantly, and the effects of wind-induced interference cannot be ignored.

Key words: large-span retractable structure; wind-induced interference effect; wind pressure characteristic distribution; CFD; interference factor

近年来,各类大跨度屋盖结构建筑[1]不断兴建,大跨度开合屋盖[2]更是成了大跨度屋盖的热点形式之一。与传统的建筑物相比,开合屋盖既能起到抵抗自然界不利因素的作用,又能保留自然气息。大跨度开合屋盖结构因其跨度极大,屋盖通常选用质轻、柔性大、刚度小的材质,由于材质的原因导致开合屋盖结构的主要外荷载是风荷载,所以风荷载[3]能够给大跨度结构带来不可估量的破坏。据不完全统计,发生在大跨度屋盖结构上的风灾损失占比在各类风灾损失中达到了50%以上。因此,针对大跨度建筑结构的抗风性研究[4]具有十分重要的意义。

目前少有学者研究周边建筑物对大跨度开合结构的风致干扰效应[5]。在现实生活中,许多大跨度结构都身处建筑群当中,周边建筑物必然会对其产生干扰效应,该大跨度结构上的风压大小以及分布形式必然会受到影响。而大跨度结构由于其自身跨度尺寸大,风压分布形式会变得更加繁杂,周围建筑物对大跨度结构干扰效应也变得更加明显。近年来,国内外学者对风致干扰效应[5]的研究在机理和实践应用方面都取得了很大的进展。文献[6]利用风洞试验研究了武汉体育中心体育馆屋盖的风压分布规律。文献[7]利用数值模拟方法研究了复杂体型高层建筑物串联及并联时的干扰效应。文献[8]利用CFD数值模拟方法对高层建筑风荷载及干扰效应进行了分析。文献[9]利用风洞试验对体育场悬挑屋盖风荷载特性及干扰效应进行了系统地研究。文献[10]对半月拱形大跨度屋盖结构的风荷载干扰效应进行了研究。但以上文献多是对平屋盖[11]或具体的实际工程进行单独研究分析,均未涉及周围其他建筑物对不同开合情况下的大跨度开合结构的风致干扰研究。

本文主要采用数值模拟法[12]对大跨度开合屋盖在全开、二分之一、三分之一开启这3种不同开合情况下的风压分布进行研究分析,为类似结构的风荷载干扰效应研究提供参考。

1 计算模型建立及验证

1.1 几何模型和网格划分

大跨度开合结构和施扰建筑的计算模型采用1∶100的缩尺比例,根据大跨度开合屋盖不同开合情况,分别建立了三分之一开、半开和全开3种开合情况下的模型,大跨度开合结构具体流场模型的长(l)、宽(w)、高(h)分别为100 cm、100 cm、35 cm,在全开启情况下横向和纵向均为60 cm,开启程度只针对横向开启,半开启为30 cm,三分之一开启为20 cm。干扰建筑物具体流场模型的长、宽、高分别为100 cm、100 cm、60 cm。结构模型如图1所示。



图1 目标建筑和干扰建筑物模型

Fig. 1 Target building and interference building model

图2为屋盖顶部的测点分布图。

数值模拟在Fluent软件中进行,计算模型直径为R,目标建筑物和施扰建筑物之中的最大高度为h_{max}。数值风场的建立应该满足相对应的长宽高比条件,计算域尺寸长为$20l$,宽为$10w$,高为$10h_{max}$,从而满足小于3%的最大阻塞率。根据文献[13],将模型置于距计算流域入口前沿1/3处,可以消除人为设置的出口边界限制。计算域模型具体尺寸为:长2 000 cm、宽1 000 cm、高350 cm。

选取计算尺寸后,采用六面体结构化网格进行

网格划分,模型核心部位进行网格加密处理,其中最小网格尺寸为0.001 m,网格总数在450万左右。

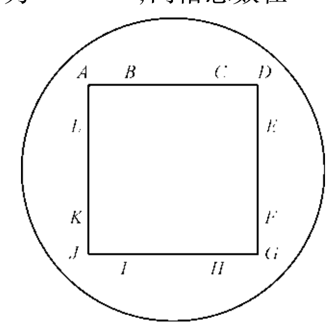


图2 测点的分布图

Fig. 2 Distribution of measuring points

1.2 边界条件

定义入口边界条件为速度入口,入口风速按照平均风速梯度公式设置,即

$$U = U_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:z为测点到地面的距离;z_0为参考高度,一般取10 m;α为地面粗糙度。

按照B类地貌设置对应的湍流强度和速度分布。定义的出口边界条件为压力出口,建筑物和计算域底部表面采用无滑移壁面,计算域侧壁和顶部采用自由滑移壁面。

1.3 模拟设置

点击Boundary Conditions设定边界条件,在Solution面板中选择SIMPLEC算法,实现速度与压强的关联,动量选择二阶迎风离散格式。在检测选项中选择残差检测,收敛标准定为均方根残差低于10^{-3},在确保收敛之后进行模拟计算。

在Fluent中湍流模型选取两方程的Standard k-ε模型进行计算。通过对以下3种开合状态的大跨度屋盖进行模拟分析,分别是屋盖开合三分之一、屋盖开合二分之一,0°风向角(施扰建筑位于屋盖来流的正前方)、45°风向角(见图3),以及10 m/s、15 m/s、20 m/s这3种风速,并且设置3种不同间距0.5 m、1 m、2 m进行模拟,通过后处理软件得到上述不同工况下的大跨度开合结构屋盖风压分布数值。

1.4 数值模拟数据处理

数值模拟结果用干扰因子IF表示,它是建筑物有干扰时的风压系数与建筑物无干扰时的风压系数之比,表达式为

$$\mathrm{IF} = \frac{C_{\mathrm{Pi}}}{C_{\mathrm{PA}}} \tag{2}$$

式中:C_{Pi}为建筑物有干扰时的风压系数;C_{PA}为建筑物无干扰时的风压系数。

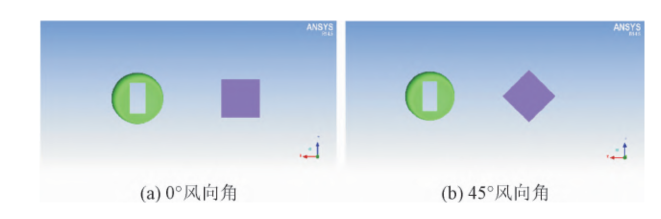


图3 0°、45°风向角示意图

Fig. 3 Diagram of 0°、45°wind direction angle

1.5 算例分析

当干扰建筑物距大跨度开合结构0.5 m时,以屋盖开合二分之一工况的风压分布图为例,在Fluent中导入网格msh文件,湍流模型选用Standard k-ε模型,再设置边界条件,点击初始化。当迭代步数在200多步时,收敛曲线趋于平稳,考虑到计算成本及计算时间,此时可以停止计算。

1.6 数值模拟验证

1.6.1 TTU试验验证

为验证本文数值模拟的正确性,需将数值模拟结果与TTU现场试验数据结果进行比较分析。TTU试验是一种测评风洞试验模拟技术的标准性的现场实测试验[14],较为权威。将风洞试验结果[15]和TTU实测试验结果[16]与数值模拟结果进行对比,结果如图4所示。

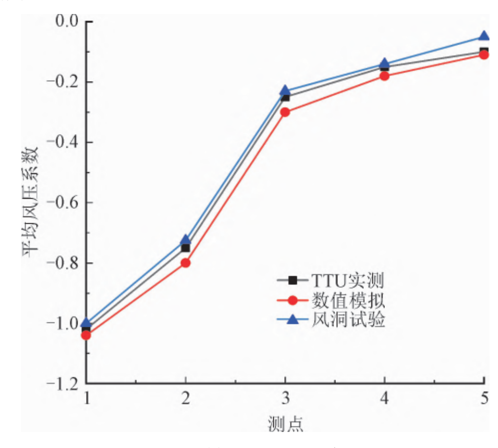


图4 结果对比示意图

Fig. 4 Results comparison diagram

由图4可以看出,3种不同方法得出的结果一致,说明本次数值模拟方法可靠性强、准确性高。

1.6.2 开合屋盖风洞试验验证

刘庆宽等在石家庄铁道大学大型结构研究所的风工程研究中心大气边界层风洞低速试验段内,对大跨度球壳结构风致干扰效应和风压分布规律进行了试验研究[17-19],将数值模拟结果与风洞试验结果进行对比。结果如图5所示。

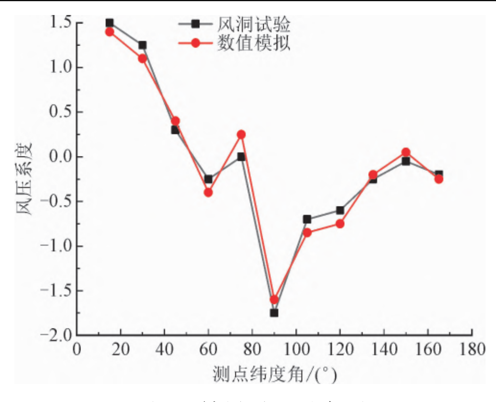


图 5　结果对比示意图

Fig. 5　Results comparison diagram

由图 5 可知，风洞试验结果和数值模拟结果非常接近，本次数值模拟方法是可行的。

2　数值模拟分析

2.1　不同风速下大跨度开合屋盖风致干扰效应分析

大跨度开合结构距流场上游干扰建筑物 500 mm 时，在 3 种不同风速(10 m/s、15 m/s、20 m/s)下，大跨度开合屋盖结构在三分之一开启、半开启、全开启 3 种不同开合情况下的屋盖表面的风致干扰影响比较见图 6。

由图 6 可知，施扰建筑风速不同，但大跨度开合屋盖结构的干扰因子 IF 数值非常接近，折线图有很多重合之处，因此推断在10 m/s、15 m/s、20 m/s 的 3 种不同风速下对大跨度开合屋盖结构的风致干扰影响较小。虽然个别测点在不同来流风速下的干扰因子数值与风洞试验的结果存在一定差异，但整体趋势较为一致。造成这种差异的原因在于：结构开洞口较大；模拟采用 Standard k-ε 模型，对湍动能估计产生些许偏差。

2.2　不同距离下的大跨度屋盖在不同风速下的平均风压系数对比

以 45°风向角下三分之一开启屋盖为例，距离模型 3 种不同距离下的不同风速平均风压系数对比分析如图 7 所示。

由图 7 可知，在模型中改变风速，风压系数几乎没有太大变化。本文的风速取 15 m/s(10 m/s、15 m/s、25 m/s 的平均值)。

2.3　不同间距对平均风压系数的影响

大跨度开合屋盖结构在不同开启程度、不同风向角、不同距离下的平均风压系数对比分析见图 8。

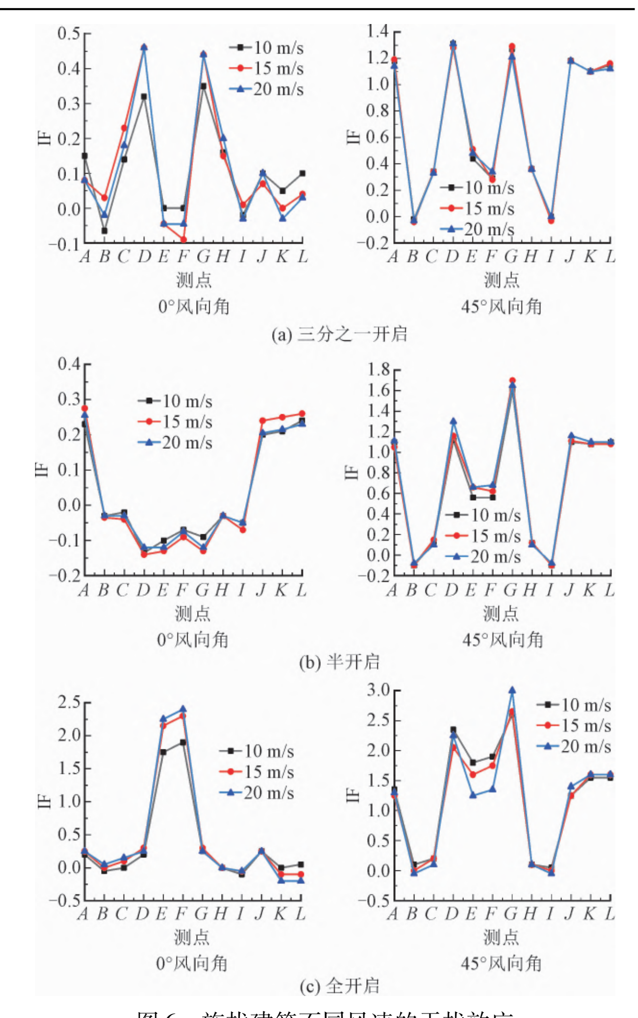


图 6　施扰建筑不同风速的干扰效应

Fig. 6　Interference effects of different wind speeds in building disturbance

(a) 500 mm施扰建筑间距　(b) 1 000 mm施扰建筑间距

(c) 2 000 mm施扰建筑间距

图 7　不同风速时大跨度开合屋盖平均风压系数

Fig. 7　Mean wind pressure coefficient of large span retractable roof at different wind speeds

由图 8 可知:1)随着单栋干扰建筑物与大跨度开合屋盖间距的增加,开合屋盖结构表面风压系数随之增大,遮挡效应随干扰建筑物与开合屋盖间距的增加而逐渐减小,在间距为 500 m 时,屋盖结构表面风压系统最小,遮挡效应最为明显;2)屋盖的风压系数的折线变化幅度与其开合面积大小呈正相关,面积增大,折线变化幅度也在增大,其中屋盖开合面积达到最大时,风压系数变化最为明显;3)开合屋盖背风面开合处两端角部的风压系数最大,主要是该两点既受到上表面的吸力作用,又受到下表面的压力作用,而且这两个力的数值较大;4)在大跨度开合结构上游施加一栋干扰建筑物时,由于大跨度开合结构与干扰建筑物之间的风场干扰效应,45°风向角下干扰效应比 0°风向角下影响更大。

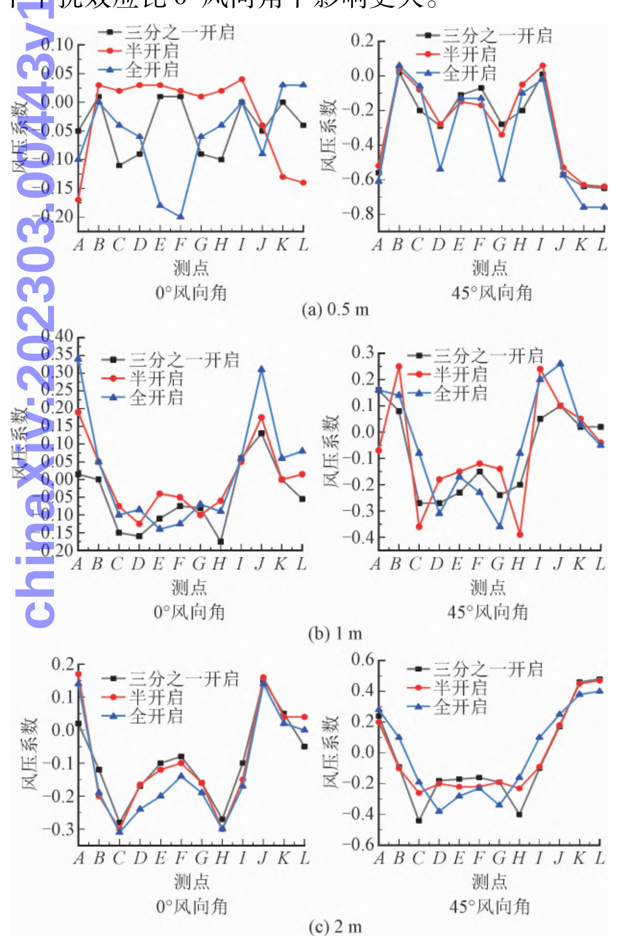


图 8 不同间距下开合屋盖对不同开合情况的平均风压对比图

Fig. 8 Comparison of average wind pressure of retractable roof at different distances

2.4 不同间距对干扰因子的影响

在大跨度开合屋盖在三分之一开启、半开启和全开启 3 种开合情况下给出了距上游干扰建筑物不同距离(500 mm、1 000 mm、2 000 mm)的情况下,对大跨度开合屋盖结构的风致干扰影响比较,见图 9。

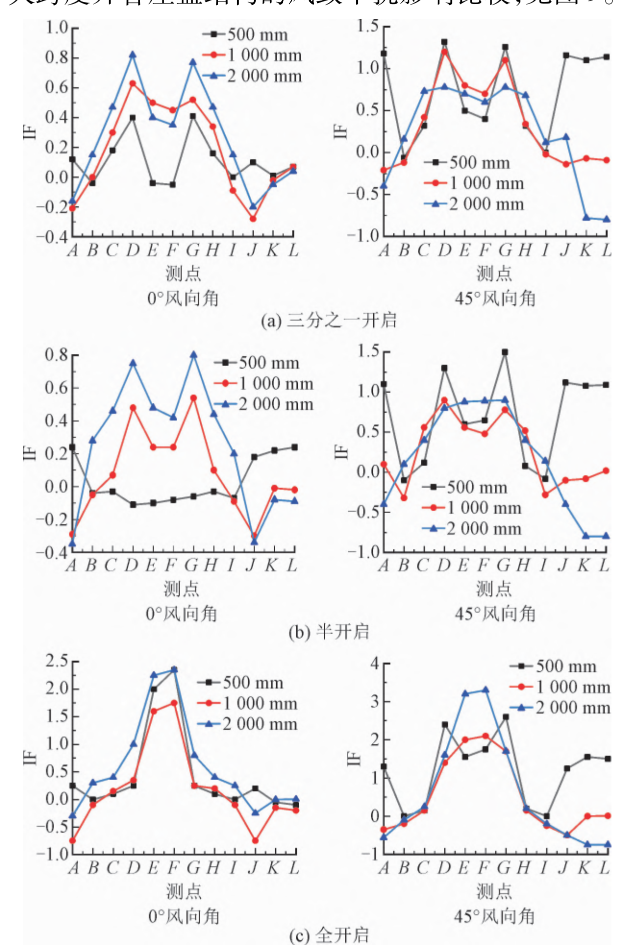


图 9 施扰建筑不同距离的干扰效应

Fig. 9 Interference effects of different distances in the scrambled building

由图 9 可知:1)随着施扰距离的增加,0°风向角时折线图除了迎风面外有整体变大的趋势;45°风向角时折线图最大值呈现整体变小的趋势。2)从全开启的干扰效应图中可以看出,在施扰建筑物下 E、F 两点的 IF 值已经达到未施扰条件的 3 倍,大跨度开合屋盖的迎风面屋盖部分对背风面的屋盖部分干扰效应明显,导致 IF 值倍增。3)图中多个测点的干扰因子 IF 为负值,说明该点区域的吸力与压力完全相反。4)随着施扰建筑距离的增加,不同开合情况、不同风向角的干扰建筑物在施扰距离为 500 mm 时的折线图变化幅度较大,说明施扰距离为 500 mm 时大跨度开合屋盖结构定义干扰因子 IF 受干扰效应最大。

3 结 论

本文采用 CFD 方法研究了在不同开合状态下,

周围存在单体干扰建筑时,大跨度开合屋盖的风致干扰效应,得到了不同工况下的大跨度屋盖表面风压分布,主要结论如下。

1)建筑物间距为 500 m 时,遮挡效应最为明显。遮挡效应随着大跨度开合结构与干扰建筑物之间间距增大而逐渐减小。

2)大跨度开合结构的风压分布受风向角影响。45°风向角下干扰效应比 0°风向角下影响大。0°和45°风向角下测点平均风压变化趋势大致相同,风压在开合屋盖背风面开合处两端角部发生量值较大的突变,后者的突变值更大,设计时应予以重视。

3)随着施扰建筑距离的增加,干扰建筑物在施扰距离为 0.5 m 时,不同开合状态以及不同风向角的折线图变化幅度较大,说明施扰距离为 500 mm 时大跨度开合屋盖结构定义干扰因子 IF 受干扰效应最大。

参考文献

[1] 张战廷. 大跨度开合屋盖结构特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[2] 孙瑛. 大跨屋盖结构风荷载特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[3] 周晓飞. 大跨度可开合屋盖结构风洞试验与等效风荷载研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[4] 张建国,雷鹰. 大跨度可开合屋盖结构的风荷载特性[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集(中册). 北京:中国土木工程学会,2009.

[5] 李永鑫. 低矮双坡屋面房屋风致干扰效应研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.

[6] 于秀雷,梁枢果,郭必武. 武汉体育中心体育馆表面风压的风洞试验研究[J]. 建筑结构,2008,38(2):103-105. (YU Xiulei, LIANG Shuguo, GUO Biwu. Wind tunnel test for wind pressure on gymnasium of Wuhan sport center[J]. Building structure, 2008, 38(2):103-105(in Chinese)).

[7] 张敏,楼文娟,何鸽俊,等. 群体高层建筑风荷载干扰效应的数值研究[J]. 工程力学,2008,25(1):179-185. (ZHANG Min, LOU Wenjuan, HE Gejun, et al. Numerical study on interference effects of wind loads about a cluster of tall buildings[J]. Engineering mechanics, 2008, 25(1):179-185(in Chinese)).

[8] 董忆夏. 采用外形气动措施的高层建筑风荷载及其干扰效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[9] 邵帅. 弧形平面体育场悬挑屋盖风荷载特性及干扰效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[10] 张敏,李名燕,孙凌云,等. 半月拱形大跨度屋盖的风荷载干扰效应研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2018,39(3):51-55. (ZHANG Min, LI Mingyan, SUN Lingyun, et al. Study of wind load disturbance effect of half-arch large span roof[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (natural science), 2018, 39(3):51-55(in Chinese)).

[11] 罗尧治,蔡朋程,孙斌,等. 国家体育场大跨度屋盖结构风场实测研究[J]. 振动与冲击,2012,31(3):64-68. (LUO Yaozhi, CAI Pengcheng, SUN Bin, et al. Field measurement of wind characteristics on roof of the national stadium[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(3):64-68(in Chinese)).

[12] 侯爱波,葛楠,周锡元. 建筑风载数值模拟的影响因素[J]. 自然灾害学报,2005,14(5):84-89. (HOU Aibo, GE Nan, ZHOU Xiyuan. Influencing factors in numerical simulation of wind load on buildings[J]. Journal of natural disasters, 2005, 14(5):84-89(in Chinese)).

[13] 沈国辉. 大跨度屋盖结构的抗风研究——屋盖结构的表面风压、风致响应和等效风荷载研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.

[14] GINGER J D, LETCHFORD C W. Net pressures on a low-rise full-scale building[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1999, 83(1/2/3):239-250.

[15] GUHA T K, SHARMA R N, RICHARDS P J. Internal pressure in a building with multiple dominant openings in a single wall: Comparison with the single opening situation[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2012, 107/108:244-255.

[16] LEVITAN M L, MEHTA K C, VANNW P, et al. Field measurements of pressures on the texas tech building[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1991, 38(2/3):227-234.

[17] 刘庆宽,卢照亮,郑云飞,等. 大跨球壳结构风压分布规律和风致干扰效应试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(10):140-146. (LIU Qingkuan, LU Zhaoliang, ZHENG Yunfei, et al. Experimental study on wind pressure distribution and wind-induced interference effects on long-span spherical structure[J]. Journal of building structures, 2016, 37(10):140-146(in Chinese)).

[18] 谭上飞,李庆祥. 大型储煤仓结构的群体风荷载研究[J]. 广东土木与建筑,2010,17(3):16-18. (TAN Shangfei, LI Qingxiang. Wind load study for large coal storehouse groups by wind tunnel tests and numerical simulation[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2010, 17(3):16-18(in Chinese)).

[19] 王旭,黄鹏,顾明. 半球形屋面结构风荷载特性试验研究[J]. 中国工程机械学报,2009,7(3):351-355. (WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming. Experimental investigation on wind load characteristics of hemispherical dome[J]. Chinese journal of construction machinery, 2009, 7(3):351-355(in Chinese)).

(编辑　张璐)